



Diodes Schottky diamant fonctionnant à 200°C

Richard Monflier, Karine Isoird, Alain Cazarré, Josiane Tasselli, Alexandra Servel, Jocelyn Achard, David Eon, Maria José Valdivia Birnbaum

► To cite this version:

Richard Monflier, Karine Isoird, Alain Cazarré, Josiane Tasselli, Alexandra Servel, et al.. Diodes Schottky diamant fonctionnant à 200°C. Symposium de Génie Electrique, G2Elab, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01245628v2

HAL Id: hal-01245628

<https://hal.science/hal-01245628v2>

Submitted on 25 Apr 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Diodes Schottky diamant fonctionnant à 200°C

Richard MONFLIER¹, Karine ISOIRD¹, Alain CAZARRE¹, Josiane TASSELLI¹, Alexandra SERVEL², Jocelyn ACHARD³, David EON⁴, Maria José VALDIVIA BIRNBAUM¹

¹ LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, UPS, Toulouse, France

² IBS, ZI Peynier-Rousset, Rue Gaston Imbert prolongée, F-13790 Peynier, France

³ CNRS, LSPM, Université Paris 13, Bâtiment L1 ou L2, 99 avenue Jean-Baptiste Clément, F-93430 Villetaneuse, France

⁴ CNRS, Institut Néel, 25 rue des Martyrs BP166, F-38042 Grenoble cedex9, France

RESUME –Les caractéristiques courant-tension jusqu'à 200 °C de diodes Schottky diamant verticales et pseudo-verticales réalisées dans le cadre du projet DIAMONIX2 sont présentées dans cet article. Sur les différents échantillons testés le taux de fonctionnalité est supérieur à 75 % et atteint même 100 % pour l'un d'entre eux. Pour les diodes verticales la densité de courant atteint 488 A/cm² à 200 °C et pour les diodes pseudo-verticales une densité de courant supérieure à 1000 A/cm² à 200 °C est obtenue. En inverse sur toutes les diodes fonctionnelles le courant de fuite mesuré est inférieur à 10⁻⁷ A/cm² à 50 V. Toutefois, la hauteur de barrière de 1,96 eV et le coefficient de non-idéalité de 1,77 sont certainement causés par une densité de charges importante à l'interface diamant/contact Schottky. La reproductibilité des caractéristiques et le fort taux de fonctionnalité à 200 °C est mis en avant dans cet article.

Mots-clés—*Diamant, Diode, Schottky, Haute Température, Simulation, Caractérisation.*

1. INTRODUCTION

L'électronique de puissance, orientée vers la gestion de l'énergie, occupe désormais une place prépondérante dans les systèmes. Les composants dédiés, majoritairement sur Silicium (Si), atteignent maintenant leurs limites de développement, tant au niveau des hautes températures que des tensions visées. Dans ce contexte de nouveaux matériaux à large bande interdite tels que le Carbure de Silicium (SiC), le Nitrure de Gallium (GaN) et le Diamant émergent. Le Diamant offre un très fort potentiel grâce entre autre, à sa conductivité thermique de 20 W.cm⁻¹.K⁻¹ et son champ de rupture de 10 MV.cm⁻¹, la nécessité d'un bon comportement à haute température et une forte tenue en tension étant primordiales pour un composant de haute puissance. A ce jour, les étapes technologiques permettant d'exploiter ce potentiel sont encore mal maîtrisées, une des difficultés majeures étant le dopage du diamant. En effet, le bore (dopant de type P) et le phosphore (dopant de type N) possèdent des énergies d'activation respectivement de 0,37 eV et de 0,57 eV à 300 K, ce qui limite le nombre de porteurs libres à température ambiante. Le dopage est principalement réalisé durant la croissance des couches [1] car l'implantation n'est toujours pas maîtrisée, malgré des travaux récurrents sur le sujet [2]. Les étapes de gravure, de réalisation de contacts ohmiques faiblement résistifs et de contact Schottky stable en température et présentant une bonne adhérence sont aussi encore à l'étude. Une autre difficulté

inhérente aux composants verticaux est d'obtenir des couches épaisses (quelques centaines de µm) et fortement dopées [3].

De nombreux articles portent sur l'étude de diodes Schottky sur Diamant démontrant des performances remarquables, comme celles des équipes de R. Kumaresan [4, 5] mais l'augmentation de la température provoque l'effondrement de la tension de seuil et une diminution de la hauteur de barrière. Ces dernières années, de nombreuses études ont été réalisées pour améliorer les performances à haute température [6-9] ; ces résultats sont encourageants.

Dans la continuité des études déjà réalisées au laboratoire [10, 11] cet article porte sur des diodes Schottky sur Diamant de type P, verticales et pseudo-verticales fonctionnant à haute température (200 °C), avec un taux de fonctionnalité intéressant et supérieur à 75 %. Nos travaux se placent dans le cadre du projet DIAMONIX2 dont l'un des objectifs porte spécifiquement sur le comportement à 200 °C. Par la suite nous détaillerons les paramètres technologiques des échantillons puis présenterons une caractérisation courant-tension ainsi qu'une comparaison simulation-mesure pour chaque type de diode.

2. PRESENTATION DES ECHANTILLONS

Les résultats présentés dans cet article concernent trois échantillons, le premier de type vertical, composé de 64 diodes de 100 µm de diamètre, le second de type pseudo-vertical comprenant 24 diodes carrées de différentes tailles et un troisième de type pseudo-vertical comptant 64 diodes de diamètre 100 µm.

Les échantillons sont représentés sur la Figure 1. Ils sont composés de contact Schottky Ni/Au de 50/450 nm et d'un contact ohmique de type Ti/Pt/Au de 50/50/500 nm, recuit à 450 °C pendant 30 min. La couche P⁻ a été réalisée par l'Institut Néel et la couche P⁺ par le LSPM, cependant la concentration en atomes dopants n'est pas connue avec exactitude.

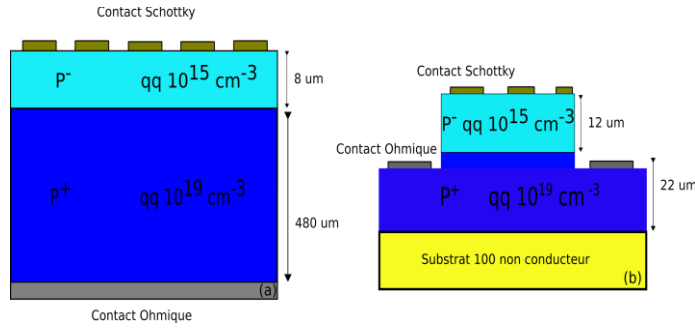


Figure 1: Coupe schématique des échantillons, (a) vertical, (b) pseudo-vertical

3. CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION EN TEMPERATURE

3.1. Echantillon vertical

3.1.1. Mesures $I(V)$ sous polarisation directe

Les mesures en température ont été effectuées sous pointes avec un Agilent 4142. Sur les 64 diodes mesurées, 48 sont fonctionnelles à 200 °C. La Figure 2 illustre la caractéristique typique d'une diode verticale. A température ambiante une densité de courant de 92 A/cm² sous 10 V et une résistance de 934 Ω sont obtenues. L'activation des dopants par la température conduit à une densité de courant de 488 A/cm² à 200 °C. La hauteur de barrière est calculée à partir de l'équation 1, elle est de 1,38 eV, le coefficient de non-idéalité est de 1,77. Sous polarisation inverse, Figure 3, un courant de fuite de 10⁻⁷ A/cm² jusqu'à 50 V est relevé, laissant présager une forte tenue en tension.

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{A^* T^2}{J_s} \right) \quad (1)$$

k : Constante de Boltzmann

q : Charge élémentaire

T : Température

A^* : Constante de Richardson (90 < A^* < 96)

J_s : Densité de courant de saturation

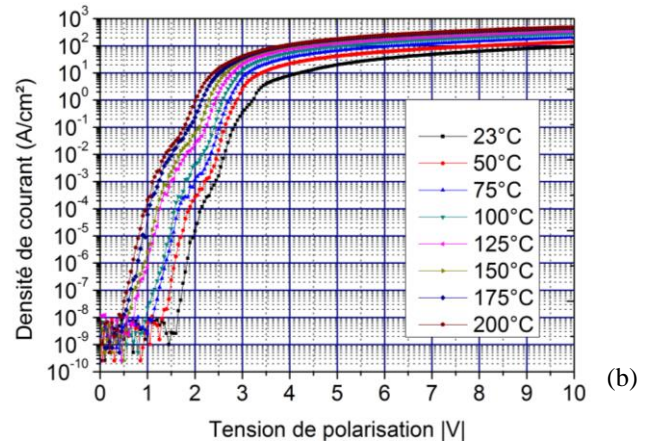
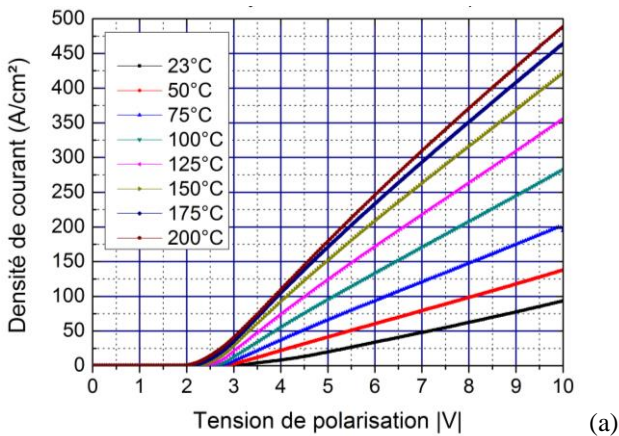


Figure 2: Caractéristique linéaire (a) et semi-logarithmique (b) d'une diode verticale sous polarisation directe en fonction de la température.

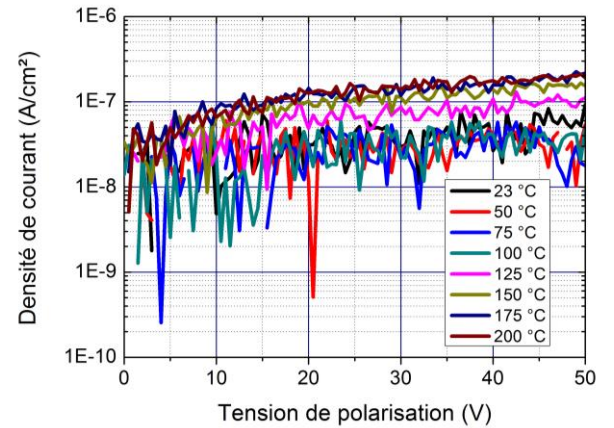


Figure 3: Caractéristique semi-logarithmique d'une diode verticale sous polarisation inverse en fonction de la température.

3.1.2. Simulations $I(V)$ sous polarisation directe

Les simulations physiques présentées ici ont été réalisées sous SENTAURUS TCAD [12]. Les modèles et paramètres utilisés sont issus de la thèse de F. Thion [11].

Pour ce type de diode, les simulations ont été effectuées avec la hauteur de barrière mesurée et différents dopages (Figure 4). Le dopage pour la simulation 1 est de 10¹⁵ cm⁻³ pour la couche P⁻ et de 10¹⁹ cm⁻³ pour la couche P⁺; pour la simulation 2 le dopage utilisé est de 3.10¹⁵ cm⁻³ pour la couche P⁻ et 6.10¹⁹ cm⁻³ pour la couche P⁺. La simulation 2 permet d'obtenir une résistance série de 860 ohms identique à celle obtenue en mesure, la limitation de courant n'est donc pas due à la résistance de contact mais aux résistances des couches homoépitaxiées. La résistance des couches prend une part non-négligeable avec 40 % de la résistance totale, les 60 % restant comprennent la résistance du substrat, de contact et des pièges. Les simulations ne comportant pas de modèle prenant en compte les pièges à l'interface, le fort coefficient de non idéalité et les différentes tensions de seuil observées peuvent être la conséquence d'une densité de charge abondante à l'interface.

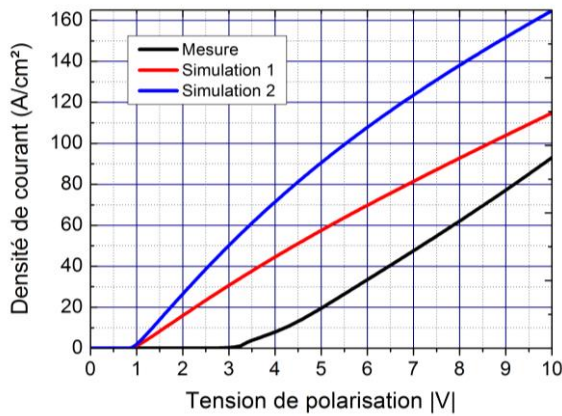


Figure 4 : Confrontation simulation-mesure à 296 K : Simulation 1 avec un dopage pour la couche P⁻ : 10^{15} cm^{-3} pour la couche P⁺ : 10^{19} cm^{-3} ; Simulation 2 avec un dopage pour la couche P⁻ : $3.10^{15} \text{ cm}^{-3}$ pour la couche P⁺ : $6.10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

La simulation du comportement en température de la diode Schottky idéale avec un dopage P⁻ de $3.10^{15} \text{ cm}^{-3}$ et P⁺ de $6.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ est illustrée sur la Figure 5. On note un croisement des caractéristiques qui est la conséquence de la montée en température, permettant l'activation des dopants et augmentant la densité de courant avec dans un même temps une diminution de la mobilité qui, à partir de 150 °C, limite l'augmentation de courant.

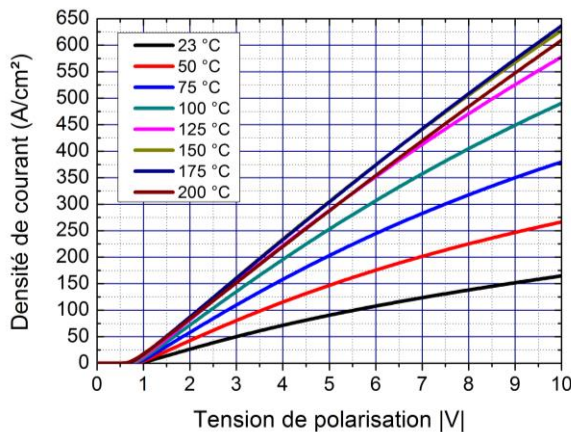


Figure 5: Simulation d'une diode idéale en température

Les simulations à 200 °C sont représentées Figure 6. Nous pouvons constater le parallélisme des courbes entre la simulation 2 et la mesure suite à un décalage de la tension de seuil, ce qui confirme la limitation du courant due à la résistance des couches. Une optimisation de la couche P⁺ pour diminuer son influence sur la résistance série est à étudier en augmentant le dopage et en optimisant son épaisseur.

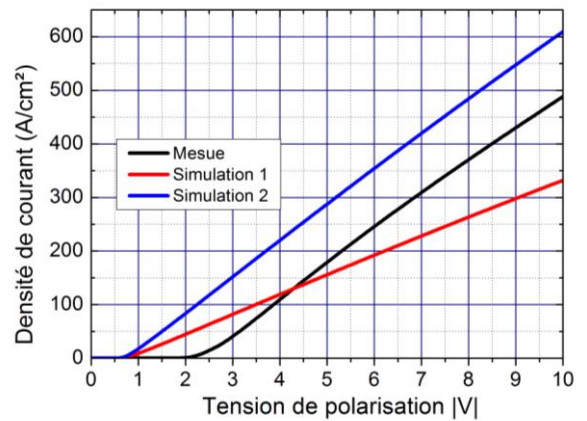


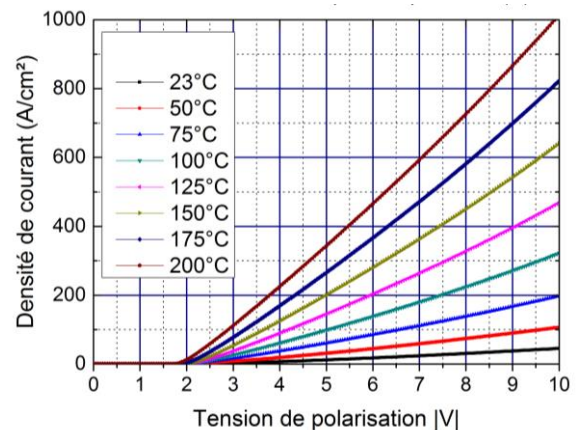
Figure 6: Confrontation simulation-mesure à 473 K

Sous polarisation inverse avec les paramètres d'ionisation de Rashid et al [13], l'avalanche apparaît aux alentours de 1600 V. Le faible courant de fuite mesuré et la concordance des mesures avec les simulations confirment des perspectives encourageantes de forte tenue en tension.

3.2. Echantillon pseudo-vertical

3.2.1. Mesures I(V) sous polarisation directe

Les mesures ont été réalisées dans les mêmes conditions que celles du précédent échantillon, 97 % des 64 diodes traitées sont fonctionnelles à 200 °C. La Figure 7 représente les caractéristiques en température d'une diode typique. Une faible densité de courant de 45 A/cm² est mesurée à température ambiante sous 10 V, loin de la valeur attendue. En augmentant la température nous obtenons 200 A/cm² à 75 °C et atteignons 1000 A/cm² à 200 °C sous 10 V. La hauteur de barrière déduite de ces mesures est élevée avec 2,09 eV et le coefficient de non-idéalité de 1,24 étant faible par rapport aux valeurs classiquement relevées, il se peut que le phénomène prépondérant soit l'émission thermoionique. Sous fonctionnement inverse, le courant de fuite est inférieur à 10^{-7} A/cm^2 sous 50 V, ce qui est satisfaisant.



(a)

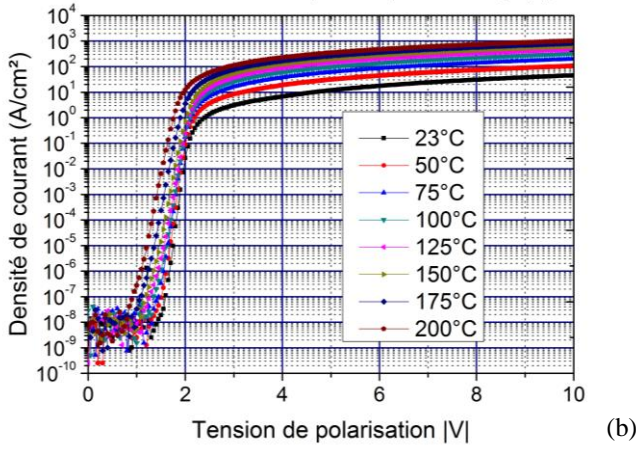


Figure 7: Caractéristique linéaire (a) et semi-logarithmique (b) d'une diode pseudo-verticale sous polarisation directe en fonction de la température.

Concernant l'échantillon pseudo-vertical avec des diodes carrées, les 24 diodes testées sont fonctionnelles à 200 °C. La Figure 8 représente la caractéristique typique d'une diode Schottky pseudo-verticale de 300 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ en fonction de la température. La densité de courant à température ambiante est de 17 A/cm² avec une résistance de 310 Ω , une faible évolution est observée à 200 °C avec une densité de courant de 48 A/cm². Des valeurs plus élevées de densité de courant étaient attendues. Ces plus faibles valeurs sont probablement liées à un dopage insuffisant de la couche P⁺, à une trop forte résistance de contact mais également à la taille importante du contact de la diode. Les valeurs des différentes tailles de diodes de cet échantillon sont reportées dans le Tableau 1. La hauteur de barrière est de 1,71 eV et le facteur de non-idéalité s'avère élevé, proche de 2.

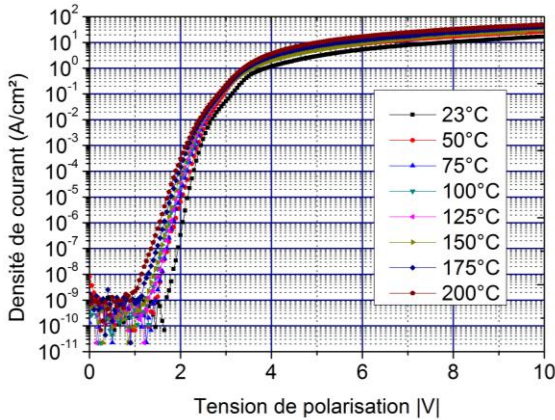


Figure 8: Caractéristique en température d'une diode pseudo-verticale carrée de 300x300 μm sous polarisation directe

Tableau 1: Récapitulatif des valeurs de densité de courant à température ambiante et à 200 °C sur les diodes pseudo-verticales carrées

Taille (μm) \square	J_s à T=23 °C (A/cm ²)	J_s à T=200 °C (A/cm ²)
100	50	196
150	25	134
200	20	100
300	17	48
400	15	34
500	8	27
1000	3	6

3.2.2. Mesures C(V)

Les mesures C(V) ont été réalisées à température ambiante avec un Agilent 4294A. Les caractérisations sous polarisation inverse vont permettre de calculer le dopage de la couche P⁺, celle-ci étant non-intentionnellement dopée [10, 14]. La Figure 9 représente une mesure C(V) d'une diode pseudo-verticale de 100 μm de diamètre. La courbe 1/C² non linéaire peut être engendrée par des charges à l'interface, l'extension de la zone de charge d'espace étant de 0,7 μm pour une tension de 10 V et 1,5 μm pour 40 V.

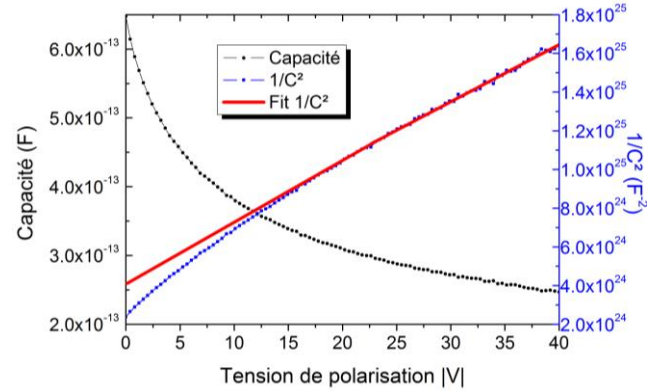


Figure 9: Mesure C(V) et calcul du 1/C² d'une diode pseudo-verticale de diamètre 100 μm à température ambiante sous polarisation inverse.

Les mesures C(V) réalisées avec une fréquence de 5 MHz et un V_{ac} de 100 mV sur plusieurs diodes ont permis d'extraire la valeur du dopage dans le film P⁺. Sa valeur est de 1,4.10¹⁶ cm⁻³. Cette valeur, reportée en simulation permet de se rapprocher des paramètres réels d'une diode.

3.2.3. Simulations I(V) sous polarisation directe

Les simulations d'une diode pseudo-verticale de diamètre 100 μm avec une hauteur de barrière correspondante aux mesures sont représentées Figure 10. La structure simulée possède un dopage P⁻ de 1,4.10¹⁶ cm⁻³ et P⁺ de 10¹⁹ cm⁻³.

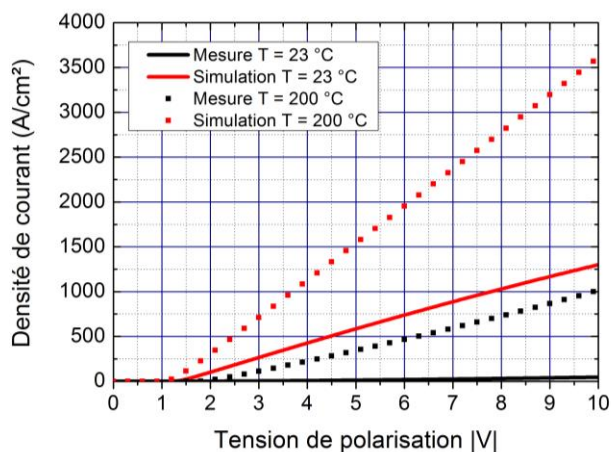


Figure 10 : Confrontation simulation-mesure à 23 °C et à 200 °C

Pour les deux échantillons, une grande différence de densité de courant entre simulation et mesure est constatée. La résistance de contact ohmique peut être élevée car le contact est réalisé sur une couche dont le dopage est insuffisant (10^{19} cm^{-3}) ce qui a pour conséquence d'obtenir, à température ambiante, une densité de courant limitée à 45 A/cm² au lieu des 1300 A/cm² attendus.

4. CONCLUSION

Les résultats présentés dans cet article démontrent un fort taux de fonctionnalité sur les trois échantillons sélectionnés, vertical et pseudo-vertical avec respectivement 75 %, 97 % et 100 % de diodes fonctionnelles à 200 °C et un courant de fuite de l'ordre du pA sous 50 V.

La densité de courant, plutôt faible à température ambiante (entre 20 et 100 A/cm²) atteint l'objectif des 200 A/cm² à 75 °C pour les deux échantillons composés de diodes de 100 µm de diamètre. Pour l'échantillon pseudo-vertical les 1000 A/cm² sont dépassés à 200 °C, ce qui est honorable.

Les trois échantillons ont un facteur de non-idéalité élevé, des charges à l'interface pourraient être la cause de ce phénomène; les échantillons pseudo-verticaux présentent une densité de courant trop faible qui pourrait avoir son origine dans la résistance de contact. L'échantillon vertical a une tension de seuil élevée due à la résistance de la couche P⁺ et à un dopage trop faible de celle-ci.

La performance de ces échantillons est dans la reproductibilité de leurs caractéristiques à température ambiante et à haute température tout en permettant d'obtenir des paramètres de densité de courant satisfaisants.

5. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été menés dans le cadre du projet FUI DIAMONIX2 soutenu par la DGA et la région Midi-Pyrénées, et effectués dans le réseau français RENATECH.

6. REFERENCES

- [1] M.-A. Pinault-Thaury, I. Stenger, F. Jomard, J. Chevallier, J. Barjon, A. Traore, D. Eon, et J. Pernot, « Electrical activity of (100) n-type diamond with full donor site incorporation of phosphorus », *Phys. Status Solidi A*, p. n/a-n/a, mai 2015.
- [2] J. Barjon, F. Jomard, et S. Morata, « Arsenic-bound excitons in diamond », *Phys. Rev. B*, vol. 89, n° 4, p. 045201, janv. 2014.
- [3] R. Issaoui, J. Achard, A. Tallaire, F. Silva, A. Gicquel, R. Bisaro, B. Servet, G. Garry, et J. Barjon, « Evaluation of freestanding boron-doped diamond grown by chemical vapour deposition as substrates for vertical power electronic devices », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, n° 12, p. 122109-122109-4, mars 2012.
- [4] R. Kumaresan, H. Umezawa, N. Tatsumi, K. Ikeda, and S. Shikata, « Device processing, fabrication and analysis of diamond pseudo-vertical Schottky barrier diodes with low leak current and high blocking voltage », *Diamond and Related Materials*, vol. 18, no. 2–3, pp. 299–302, Feb. 2009.
- [5] R. Kumaresan, H. Umezawa, and S. Shikata, « Vertical structure Schottky barrier diode fabrication using insulating diamond substrate », *Diamond and Related Materials*, vol. 19, no. 10, pp. 1324–1329, Oct. 2010.
- [6] A. Traoré, P. Muret, A. Fiori, D. Eon, E. Gheeraert, et J. Pernot, « Zr/oxidized diamond interface for high power Schottky diodes », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, n° 5, p. 052105, févr. 2014.
- [7] K. Ueda, K. Kawamoto, et H. Asano, « High-temperature and high-voltage characteristics of Cu/diamond Schottky diodes », *Diam. Relat. Mater.*, vol. 57, p. 28-31, août 2015.
- [8] V. D. Blank, V. S. Bormashov, S. A. Tarelkin, S. G. Buga, M. S. Kuznetsov, D. V. Teteruk, N. V. Komilov, S. A. Terentiev, and A. P. Volkov, « Power high-voltage and fast response Schottky barrier diamond diodes », *Diamond and Related Materials*, vol. 57, pp. 32–36, Aug. 2015.
- [9] H. Umezawa, S. Shikata, and T. Funaki, « Diamond Schottky barrier diode for high-temperature, high-power, and fast switching applications », *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 53, no. 5S1, p. 05FP06, May 2014.
- [10] S. Koné, « Développement de briques technologiques pour la réalisation des composants de puissance en diamant monocristallin », PhD Thesis, 2011.
- [11] F. Thion, « Conception de protections périphériques applicables aux diodes Schottky réalisées sur diamant monocristallin », INSA de Lyon, 2012.
- [12] « Sentaurus User Guide I-2013.12 »
- [13] S. J. Rashid, A. Tajani, D. J. Twitchen, L. Coulbeck, F. Udrea, T. Butler, N. L. Rupasinghe, M. Brezeanu, J. Isberg, A. Garraway, M. Dixon, R. S. Balmer, D. Chamund, P. Taylor, and G. A. J. Amaratunga, « Numerical Parameterization of Chemical-Vapor-Deposited (CVD) Single-Crystal Diamond for Device Simulation and Analysis », *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 55, no. 10, pp. 2744–2756, 2008.
- [14] A. Nawawi, K. J. Tseng, Rusli, G. A. J. Amaratunga, H. Umezawa, and S. Shikata, « Characterization of vertical Mo/diamond Schottky barrier diode from non-ideal I-V and C-V measurements based on MIS model », *Diamond and Related Materials*, vol. 35, pp. 1–6, May 2013.